

УДК 623.445:531.58:621.791.13

Загорянский В.Г., к.т.н., доц.

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, г. Кременчуг, Украина

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ БИМЕТАЛЛА СТАЛЬ-АЛЮМИНИЙ ПО РАСЧЕТНЫМ КРИТЕРИЯМ ПРОТИВОПУЛЬНОЙ БРОНЕСТОЙКОСТИ

Zagoryanskiy V.

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, Kremenchuk, Ukraine (zagor_vlad@ukr.net)

JUSTIFICATION OF THE SUITABILITY OF THE STEEL-ALUMINUM BIMETAL BY THE CALCULATING CRITERIA OF THE BULLETPROOF ARMOR PROTECTION

В статье сопоставлены расчетные критерии бронестойкости защитных материалов, предложенные различными авторами. Для двухслойного биметалла, полученного сваркой взрывом, оптимальным признан расчетный критерий Стиглица. Расчетное значение критерия Стиглица для биметалла сталь 65Г+алюминий АД0 с равными толщинами слоев более чем в 2 раза превышает приведенные в литературе значения этого критерия для броневой стали, но, как и для броневой стали, на порядок меньше значения этого критерия для эффективной противопульной керамики (горячепрессованного карбида бора). Данный биметалл вполне приемлем по расчетному критерию противопульной бронестойкости, а по экономическим соображениям может успешно конкурировать как с броневой сталью, так и с ударопрочными броневыми керамическими материалами.

Ключевые слова: противопульная броня, критерий бронестойкости, сварка взрывом, двухслойная композиция, стальная броня с алюминиевой подложкой.

Введение. В работах [1-3] в разделах, посвященных анализу эффективности броневой защиты, на примере противопульных керамических бронезащитных материалов приводятся различные расчетные критерии бронестойкости, показывающие относительную бронестойкость различных материалов. Под бронестойкостью здесь понимается устойчивость броневой защиты к воздействию средств поражения заданного типа.

Для броневой стали простейшим способом увеличения ее пулестойкости было бы повышение ее твердости. Однако известно [1], что при использовании в качестве преграды гомогенной углеродистой броневой стали при ее твердости выше 55 HRC, сталь становится хрупкой и при обстреле даже обычными стальными пулями поражается по типу пролома или раскола. Чтобы этого избежать, пластичность стали (относительно сужение) должна быть в пределах 30 %. Гомогенная броня по толщине листа характеризуется относительной однородностью механических свойств и химического состава [1].

Одним из возможных путей повышения пулестойкости стальной брони, как указывается в той же работе [1], является создание биметаллической брони с внешним слоем высокой твердости (55...60 HRC) и тыльным вязким слоем. Такую композицию можно получить, например, сваркой взрывом, пакетной прокаткой или иными способами. В Российской Федерации серийное производство такой биметаллической брони пока не освоено, хотя на Западе они используются достаточно широко [4].

В ходе работы, направленной на получение эффективных и экономичных пластин для бронежилетов, исследователями Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского была проведена серия экспериментов, в результате которых сваркой взрывом по оригинальной технологии были получены композиции, основу которых составили пластины рессорной стали 65Г толщиной 6 мм (внешний твердый слой) и листового алюминия АД0 толщиной 6 мм (тыльный вязкий слой, подложка).

При простреле данных композиций пулями калибра 5,45 мм с расстояния 60 м и пулями калибра 7,62 мм с расстояния 30 м пули увязали в теле пластины, что говорит о применимости данной композиции в качестве противопульной брони. Относительно низкая стоимость исходных материалов композиции, взрывчатого вещества (аммонит № 6ЖВ в смеси с аммиачной селитрой) и вспомогательных материалов делают получение такой композиции сваркой взрывом (при условии отработки промышленной технологии) более экономически выгодным, чем других броневых материалов.

Безусловно, целесообразно аналитически сравнить данную композицию с броневыми сталями и другими материалами по расчетным критериям противопульной бронестойкости, приняв за основу характеристики механических свойств композиции и соотношение в ней толщин слоев, обосновав, таким образом, применимость данной композиции как альтернативы известным противопульным бронезащитным материалам.

Цель работы – сравнение, по известным расчетным критериям бронестойкости, распространенных бронезащитных противоположных материалов (броневой стали, броневой керамики) с полученным сваркой взрывом биметаллом сталь-алюминий как материалом для двухслойной брони.

Исследование. Для получения оптимальных значений расчетных критериев бронестойкости, предложенных различными авторами [5], предполагается, что броневые материалы обладают достаточно низкой плотностью, высокими значениями твердости, модуля упругости, скорости прохождения звуковых волн в материале и трещиностойкости.

Наиболее простым является критерий Д.Дж. Вехницкого, М.Дж. Славина и М.И. Климана [3], который имеет вид:

$$I = \rho \cdot c, \quad (1)$$

где ρ – плотность материала (здесь и далее речь будет идти о материале брони), кг/м^3 ; c – скорость распространения звуковых волн в материале, м/с .

Эмпирический критерий, предложенный В.С. Нешпором, А.Л. Майстренко, Г.П. Зайцевым и др. [1], демонстрирует способность бронезащитных материалов к рассеянию и поглощению кинетической энергии ударника за счет введение в выражение критического коэффициента интенсивности напряжений

$$\Phi = \frac{0,36c \cdot HV \cdot E}{K_{IC}^2}, \quad (2)$$

где HV – твердость по Виккерсу, ГПа ; E – модуль упругости, ГПа ; K_{IC} – критический коэффициент интенсивности напряжений, $\text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ (ГОСТ 25.506-85 "Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении").

Широко распространен также критерий Ж.Ж. Стиглица [1]:

$$G = \frac{E \cdot H_K}{\rho}, \quad (3)$$

где H_K – твердость по Кнупу, ГПа .

Имеется также измененное выражение (3), приведенное в работе [2]

$$M = \frac{E \cdot H_K \cdot \sigma_B \cdot T_{пл}}{\rho}, \quad (4)$$

где σ_B – предел прочности при растяжении, ГПа , $T_{пл}$ – температура плавления, К .

Отметим, что для каждого критерия с его увеличением ударостойкость (противопульная бронестойкость) возрастает.

Свойства эффективной бронекерамики в сравнении с броневой сталью [1-3] и рассчитанные по зависимостям (3) и (4) значения критериев бронестойкости приведены в табл. 1.

Таблица 1

Свойства материалов [1-3] и рассчитанные значения критериев бронестойкости

Материал	E , ГПа	H_K , ГПа	σ_B , ГПа	$T_{пл}$, К	ρ , кг/м^3	G , $\text{ГПа}^2 \cdot \text{м}^3 / \text{кг}$	M , $(\text{ГПа} \cdot \text{м})^3 \cdot \text{К/кг}$
Карбид бора горячепрессованный	450	30	0,3	3300	2500	5,4	5346
Броневая сталь	210	3,5	2,2	1950	7800	0,1	404

Здесь следует отметить, что, несмотря на то, что наиболее высокие защитные свойства имеют броневые материалы на основе карбида бора, их массовое применение сдерживается высокой стоимостью их горячего прессования [2]. Плитки из карбида бора используются в случае необходимости значительного существенного снижения массы броневой защиты, в частности, в летательных аппаратах.

Для биметалла модуль упругости при растяжении может быть определен по зависимости [6]:

$$E_{12x} = \frac{E_2 \left[1 - R \left(1 - \frac{E_1}{E_2} \cdot \frac{1 - \mu_2}{1 - \mu_1} \right) \right]}{1 - \mu_2 R (1 - m)}, \quad (5)$$

$$m = \frac{\mu_1}{\mu_2} \cdot \frac{1 - \mu_2}{1 - \mu_1}, \quad (6)$$

E_1 и E_2 – модули упругости компонентов плакирующего и основного слоя; $R = \delta_i / \delta$ – соотношение толщин одного из компонентов (i) и всей композиции (δ); μ_1 и μ_2 – коэффициенты Пуассона компонентов.

Плотность ρ_{12} биметалла определяется по формуле

$$\rho_{12} = \rho_1 - a(\rho_1 - \rho_2), \quad (7)$$

где ρ_1 – плотность материала плакирующего слоя, кг/м^3 ; ρ_2 – плотность материала основного слоя, кг/м^3 ;
 $a = \frac{\delta_2}{\delta_1 + \delta_2}$, где δ_1 и δ_2 – толщина соответственно плакирующего и основного слоя. Очевидно, что величины R и a – тождественны.

Данная зависимость аналогична приведенной в работе [6], согласно которой свойства биметалла можно прогнозировать на основании правила смесей, предполагающего линейную зависимость

$$y_{12} = y_1 + y_2(1 - R), \quad (8)$$

где y_{12} – прогнозируемое свойство биметалла; y_1 и y_2 – свойства исходных составляющих биметалла.

Величина предела прочности биметалла может быть определена для по зависимости [6]:

$$\sigma_{612} = \sigma_{62} \left[1 - R \left(\left(1 - \frac{E_1}{E_2} \cdot \frac{1 - \mu_2}{1 - \mu_1} \right) \right) \right], \quad (9)$$

где σ_{62} – предел прочности (временное сопротивление разрыву) основного слоя биметалла.

Для расчетов характеристик биметаллов приняты следующие величины [7, 8]:

– для стали 65Г: $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$; $E = 215 \text{ ГПа}$; $\mu = 0,28$. Значение предела прочности принято среднее по трем образцам (ГОСТ 1497-84 "Металлы. Методы испытаний на растяжение"), равное 795 МПа;

– для алюминия АД0: $\rho = 2700 \text{ кг/м}^3$; $E = 70,6 \text{ ГПа}$; $\mu = 0,345$. Значение предела прочности принято среднее по трем образцам (ГОСТ 1497-84 "Металлы. Методы испытаний на растяжение"), равное 70 МПа.

Так как толщины основного и плакирующего слоя в биметалле равны, то значения R и a равны 0,5.

Расчет модуля упругости биметалла по зависимости (5) дает значение 139 МПа.

Расчет плотности биметалла по зависимостям (7) и (8) дает значение 5275 кг/м^3 .

Расчет предела прочности биметалла по зависимости (9) дает значение 541 МПа.

Для биметалла сложности возникают при определении твердости по Кнупу и температуры плавления.

В формулах (3) и (4) фигурирует параметр H_K , называемый в работах [1-3] твердостью по Кнупу.

Метод определения твердости по Кнупу является несколько экзотическим, поэтому вкратце его охарактеризуем [9,10]. Испытания, аналогичные измерению микротвердости по ГОСТ 9450-76 "Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников" при вдавливании четырехгранной пирамиды с ромбическим основанием, в США носят название "метод определения твердости по Кнупу".

Очевидно, что в работах [1-3] речь идет об измерении микротвердости по Кнупу (метод Кнупа – метод измерения микротвердости вдавливанием ромбовидной алмазной пирамиды).

Как известно, измерение микротвердости используется для оценки свойств отдельных структурных составляющих материала, его очень тонких поверхностных слоев, покрытий, мелких деталей, фольги, а также хрупких тел (стекол, эмалей и др.), которые разрушаются при использовании обычных методов оценки твердости.

Имеется стандарт ISO 4545-1-4:2005 "Материалы металлические. Определение твердости по Кнупу". Часть 1 этого стандарта, к примеру, описывает метод испытания, часть 4 содержит таблицу значений твердости.

Метод определения твердости по Кнупу основан на вдавливании наконечника, имеющего форму четырехгранной алмазной пирамиды с углами между противоположными гранями 130° и 172° . Наконечник оставляет на поверхности материала удлиненный ромбовидный отпечаток с соотношением между длинной и короткой диагональю 7:1. Нагрузка при этом испытании обычно составляет от 10-1000 г (0,1...100 Н), поэтому такие испытания называют испытаниями на микротвердость или микроиндентацию. Такое испытание чаще всего проводят в случае хрупких образцов или их небольшой площади, так как минимальная деформация материала происходит вдоль короткой диагонали.

Полученный отпечаток или невосстановившуюся площадь измеряют в мощный микроскоп в комбинации с нитяными окулярами. В последнее время измерение (а также расчет значения твердости) производится автоматически с помощью программного обеспечения, анализирующего изображение [10].

Важным в данном случае является то, что, как отмечается в работе [9], в интервале нагрузок 1–5 Н значения микротвердости, определяемые по ГОСТ 9450-76 вдавливанием четырехгранной пирамиды с квадратным основанием, и твердости по Кнупу практически совпадают [11].

Таким образом, для подстановки значения твердости по Кнупу в выражения для расчетных критериев для биметалла, полученного сваркой взрывом, выполнялись измерения по методике определения микротвердости ГОСТ 9450-76 (вдавливанием четырехгранной пирамиды с квадратным основанием) при нагрузке 4,905 Н (0,5 кгс).

Расчет величины микротвердости (в МПа) по методу Виккерса выполнялся по формуле [12]

$$HV = \frac{1,854 \cdot P}{d^2}, \quad (10)$$

где P – нагрузка, Н (4,905 Н). При определении микротвердости по методу Виккерса величина d в формуле (10) представляет собой среднеарифметическую величину длин d_1 и d_2 диагоналей отпечатка. Эта величина подставлялась в формулу (10) в миллиметрах.

Получены значения микротвердости со стороны стали 65Г (как основного, воспринимающего ударную нагрузку слоя) в пределах 8...9 ГПа.

Таким образом, расчет по зависимости (3) – по критерию Ж.Ж. Стиглица [1] дает следующий результат:

$$G = \frac{E_{12} \cdot H_K}{\rho_{12}} = \frac{139 \cdot 8,5}{5275} = 0,22 \quad (11)$$

Критерий Стиглица для полученного сваркой взрывом биметалла сталь 65Г+алюминий АД0 более чем в 2 раза превышает этот критерий для броневой стали [2,3], но, как и броневая сталь, на порядок меньше значения этого критерия для горячепрессованного карбида бора (табл. 1).

При расчете по зависимости (4) для биметалла возникает необходимость в определении его температуры плавления, что заставляет отказаться от расчета.

Выводы. 1. Для сравнения защитных свойств полученного сваркой взрывом биметалла сталь 65Г+алюминий АД0 с другими броневыми материалами оптимален критерий Стиглица. Также можно рекомендовать его использование при анализе применимости других биметаллов для брони.

2. Расчетное значение критерия Стиглица для биметалла сталь 65Г+алюминий АД0 более чем в 2 раза превышает значения этого критерия (приведенные в литературе) для броневой стали, но, как и для броневой стали, на порядок меньше значения этого критерия для эффективной противопульной керамики (горячепрессованного карбида бора).

3. Таким образом, полученный биметалл сталь 65Г+алюминий АД0 по расчетному критерию пригодности материала для броневой защиты (противопульной бронестойкости) вполне приемлем, а по экономическим соображениям может успешно конкурировать как с броневой сталью, так и с ударопрочными броневыми керамическими материалами.

Анотація. У статті порівнюються розрахункові критерії бронестійкості захисних матеріалів, запропоновані різними авторами. Для двошарового біметалу, отриманого зварюванням вибухом, оптимальним визнаний розрахунковий критерій Стигліца. Розрахункові значення критерію Стигліца для біметалу сталь 65Г+алюміній АД0 з рівними товщинами шарів більш ніж в 2 рази перевищує наведені в літературі значення цього критерію для броньової сталі, але, як і для броньованої сталі, на порядок менше значення цього критерію для ефективної противопульної кераміки (горячепресованого карбиду бору). Даний біметал цілком прийнятний за розрахунковим критерієм противопульної бронестійкості, а з економічних міркувань може успішно конкурувати як з броньовою сталлю, так і з удароміцними броньовими керамічними матеріалами. **Ключові слова:** противопульна броня, критерій бронестійкості, зварювання вибухом, двошарова композиція, сталева броня з алюмінієвою підкладкою.

Abstract. Purpose. On the basis of well-known calculating criteria of armor protection to compare the common armor protection bulletproof materials (steel armor, armor ceramics) with the bimetal made by explosion welding as a material for a two-layer armor.

Design/methodology/approach. Calculating criteria of armor resistance of materials are depending on which includes the density of the material, its micro-hardness and other properties. Density and other properties of the bimetal is determined using well-known formulas. Microhardness of the bimetal's surface is measured. Stiglitz criterion is calculated using these data.

Findings. Calculated value of the Stiglitz criterion for bimetal 65Г + aluminum АД0 with equal layer thicknesses is more than twice of the value of this criterion (cited in the literature) for armored steel, but as steel armor, in ten times less than the value of this criterion for effective bulletproof ceramics (hot-pressed boron carbide).

Originality/value. Bimetal steel 65Г + aluminum АД0 made by explosion welding is quite acceptable from the point of view of calculating criteria of bulletproof armor protection, and from economic reasons can successfully compete with both armor steel and impact-resistant armor ceramic materials.

Keywords: bulletproof armor, armor protection criterion, explosion welding, two-layer composition, steel armor with an aluminum substrate.

Бібліографічний список використаної літератури

1. *Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования* / В.А. Григорян, И.Ф. Кобылкин, В.М. Маринин, Е.Н. Чистяков. Под ред. В.А. Григоряна. – М.: Изд. РадиоСофт, 2008. – 406 с.
2. *Рогов В.А.* Современные машиностроительные материалы и заготовки / В.А. Рогов, Г.Г. Позняк. – М.: Издательский центр "Академия", 2008. – 336 с.
3. *Непочатов Ю.К.* Разработка составов и технологии получения корундовой бронекерамики с радиопоглощающим феррит-содержащим покрытием: дисс. канд. техн. наук: 05.17.11 / Ю.К. Непочатов. – Томск, 2014. – 171 с.
4. *Гладышев С.А.* Броневые стали / С.А. Гладышев, В.А. Григорян. – М.: «Интермет Инжиниринг», 2010. – 336 с.
5. *Неорганическое материаловедение, в 2-х томах. Энциклопедическое издание.* / под ред. Г.Г. Гнесина и В.В. Скорохода. – К.: Наукова думка, 2010. – Т.2. – Книга 1. – 854 с.
6. *Биметаллы* / Л.Н. Дмитров, Е.В. Кузнецов, А.Г. Кобелев [и др.]. – Пермское книжное изд., 1991. – 415 с.
7. *Лившиц Б.Г.* Физические свойства металлов и сплавов / Б.Г. Лившиц, В.С. Крапошин, Я.Л. Липецкий. – М.: Металургия, 1980. – 320 с.

8. *Марочник* сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин [и др.]; под общ. ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
9. *Тушинский Л.И.* Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий / Л.И. Тушинский, А.В. Плохов. – Новосибирск: Наука, 1986. – 216 с.
10. *Испытание* по Кнупу [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.wilson-hardness.ru/Ресурсы/Методы_испытаний/Испытание_по_Кнупу.aspx.
11. *Шведков Е.Л.* Словарь-справочник по порошковой металлургии / Е.Л. Шведков, Э.Т. Денисенко, И.И. Ковенский. – К.: Наукова думка, 1982. – 270 с.
12. *Харитонов Л.Г.* Определение микротвердости / Л.Г. Харитонов. – М.: Металлургия, 1967. – 48 с.

References

1. *Materialy i zashchitnye struktury dlya lokal'nogo i individual'nogo bronirovaniya* (Materials and protective structure for local and individual armour. V.A. Grigoryan, I.F. Kobylkin, V.M. Marinin, E.N. Chistyakov. Pod red. V.A. Grigoryana. Moscow: Radiosoft, 2008, 406 p.
2. *Rogov V.A., G.G. Poznyak Sovremennye mashinostroitel'nye materialy i zagotovki* [Modern machine-building materials and blanks]. Moscow: Academia, 2008, 336 p.
3. *Nepochatov Yu.K. Razrabotka sostavov i tehnologii polucheniya corundovoj bronekeramiki s radiopogloshchayushchim ferrit-soderzhashchim pokrytiem* [Development of compounds and technologies for corundum armour ceramic with radio absorbing ferrite-containing coating]: diss. of cand. of sciences. Tomsk, 2014, 171 p.
4. *Gladyshev S.A., Grigoryan V.A. Bronevye stali* [The armour steels]. Moscow: Internet Ingeneering, 2010, 336 p.
5. *Neorganicheskoe materialovedenie* [Non-organic science of marerials]. Pod red. G.G Gnesina i V.V. Skorohoda. Kyiv Naukova dumka, 2010, T.2, Kniga 1, 854 p.
6. *Bimetally* [Bimetals]. L.N. Dmitrov, E.V. Kuznetsov, A.G. Kobelev [i dr.]. Perm': knizhnoe izd., 1991, 415 p.
7. *Livshits B.G., V.S. Kraposhin, Ya.L. Lipetskiy. Fizicheskie svoystva metallov i spлавov* [Physical propeertyies of metals and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1980, 320 p.
8. *Marochnik staley i spлавov* [Grades of steels and alloys] Pod obsh. red. V.G. Sorokina. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 640 p.
9. *Tushinskij L.I., Plovov A.V. Issledovanie struktury i fiziko-mehanicheskikh svoystv pokrytij* [Research of structure inf physical-mmechanical properties of claddings]. Novosibirsk, Nauka, 1986, 216 p.
10. *Ispytanie* по Кнупу [Cnoop's test]. http://www.wilson-hardness.ru/Ресурсы/Методы_испытаний/Испытание_по_Кнупу.aspx.
11. *Shvedkov E.L., E.T. Denisenko, I.I. Kovenskij. Slovar'-spravochnik po poroshkovoј metallurgii* [Dictionary-handbook of powder metallurgy]. Kiev: Naukova dumka, 1982, 270 p.
12. *Kharitonov L.G. Opredelenie mirotverdosti* [Evaluation of microhardness]. Moscow: Metallurgiya, 1967, 48 p.

Подана до редакції 20.01.2015